

Artur Szafarz, Zbigniew Błaszkiwicz  
Instytut Inżynierii Rolniczej  
Akademia Rolnicza Poznaniu

## ANALIZA DOKŁADNOŚCI MODELI UKŁADU KOŁO-PODŁOŻE DLA WARUNKÓW SPULCHNIONEJ GLEBY LEKKIEJ

### Streszczenie

W pracy przedstawiono analizę dokładności znanych modeli układu koło - podłoże dla warunków ruchu kół po spulchnionej glebie lekkiej. Obliczone z modeli w badaniach symulacyjnych takie parametry jak głębokość koleiny, opór toczenia i siła uciągu kół, na podstawie parametrów opon i parametrów trakcyjnych gleby wyznaczonych doświadczalnie, odniesiono odpowiednio do rezultatów badań empirycznych. Wykazano małą dokładność analizowanych modeli z wyjątkiem uwzględniających wiele parametrów opon i podłoża modeli Błaszkiwicza opartych o metody numeryczne.

**Słowa kluczowe:** modele układu koło – podłoże, weryfikacja numeryczna i empiryczna, spulchniona gleba lekka

### Wstęp i cel pracy

Ruch kołowych ciągników rolniczych po spulchnionej glebie lekkiej podczas współpracy z coraz cięższymi agregatami uprawowo - siewnymi jest szczególnie energochłonny i powoduje znaczne ugniatanie gleby. Zagłębione w glebie koła ogumione są przemieszczane z oporem toczenia wynoszącym nawet połowę rozwijanej siły uciągu prowadząc do znacznych jej strat i obniżenia sprawności mechanizmów jezdnych ciągników rolniczych. Zatem prognozowanie parametrów trakcyjnych kół w uprawie gleby nabiera szczególnego znaczenia oraz wymaga stosowania dobrych modeli dla uzyskiwania zadowalających wyników obliczeń. Jednak przydatność do powyższych celów modeli układu koło-gleba opracowanych przez specjalistów w niniejszej dziedzinie wiedzy, przede wszystkim przez Saakjana [1959], Uffelmanna [1961], Bekkera [1969], Sołtyńskiego [1977] i Wonga [2001], nie jest znana ze względu na brak weryfikacji empirycznej, natomiast są one akceptowane dla innych warunków ruchu. Modele innych autorów mają podobną postać do powyżej cytowanych, opierają się na zbliżonych założeniach do

powyższych, są mniej przydatne ze względu na stosowanie nieznanymi współczynników i metod ich wyznaczania oraz na konieczność opracowania specjalnych numerycznych metod obliczeń.

Celem niniejszej pracy była ocena dokładności wybranych modeli układu koło gleba w zakresie wyznaczania zagłębienia opon, oporu toczenia i siły uciągu kół do rezultatów badań empirycznych.

W zakresie pracy:

- dokonano empirycznego wyznaczenia współczynników i parametrów trakcyjnych kół niezbędnych dla przeprowadzenia obliczeń z użyciem analizowanych modeli,
- przeprowadzono pomiary weryfikowanych parametrów: zagłębienia, oporu toczenia i siły uciągu kół w badaniach polowych,
- przeprowadzono obliczenia powyższych parametrów z użyciem analizowanych modeli,
- oraz obliczono błędy aproksymacji uzyskanych rezultatów obliczeń w odniesieniu do wyników badań empirycznych.

Empiryczne wyznaczenie współczynników i parametrów trakcyjnych podłoża niezbędnych dla analizowanych modeli

Badania przeprowadzono na spulchnionej glebie lekkiej o składzie granulometrycznym piasku gliniastego. Analizę dokładności przeprowadzono dla opony napędowej 16,9–34 i jej parametrów eksploatacyjnych najczęściej stosowanych podczas pracy w warunkach polowych (tabela 1). Do analizy wybrano modele układu koło-podłoże przedstawione w tabelach 2 i 3.

Pomiary właściwości mechanicznych gleby przeprowadzono według ogólnie przyjętych metod. Pomiary spójności  $c$  i kąta tarcia wewnętrznego  $\phi$  przeprowadzono metodą ścinania gleby w aparacie bezpośredniego ścinania. Wyznaczenie parametrów trakcyjnych gleby  $k_c$ ,  $k_\phi$ ,  $k$  oraz  $n$  dokonano na podstawie rezultatów badań polowych przeprowadzonych za pomocą bewametry ręcznego [Błaszkiwicz, 1995], zgodnie z metodą przedstawioną przez Bekkera [1969] i Wonga [2001]. Parametr  $K$  charakteryzujący poziome odkształcenie gleby wyznaczono na podstawie wyników pomiarów ścinania gleby w aparacie bezpośredniego ścinania zgodnie z metodą przedstawioną przez Okello [1991], Dwyera [1984] i Wonga [2001]. Parametry podobieństwa płytki bewametry do opony niezbędne do modelu Sołtyńskiego [1977] i Błaszkiwicza [1997] określono metodami przedstawionymi w cytowanych pracach. Uzyskane rezultaty zamieszczono odpowiednio w tabeli 1.

Tabela 1. Dane wejściowe do obliczeń w postaci parametrów opon, podłoża oraz bewametu płytkowego.

Table 1. Input data for the calculation - the parameters of the tyre, soil and bevameter

Parametry	Oznaczenie i wartość
Wymiary opony 16.9-34: promień opony nieodkształconej szerokość wysokość wysokość do najszerszego miejsca opony	$r_o = 74,7$ cm $b_o = 44,0$ cm $h = 31,5$ cm $H = 18,5$ cm
Parametry eksploatacyjne opon: obciążenie ciśnienie wewnętrzne średni nacisk opony na glebę	$G = 13,4$ kN $p_w = 100$ kPa $q = 110$ kPa
Parametry mechaniczne i trakcyjne gleby: spójność kąt tarcia wewnętrznego współczynnik poziomej odkształcalności gleby moduł odkształcalności gleby zależny od jej spójności moduł odkształcalności gleby zależny od jej właściwości ciernych moduł odkształcalności gleby bezwymiarowy wykładnik określający właściwości trakcyjne gleby	$c = 0,00116$ kN/cm <sup>2</sup> $\Phi = 29^\circ$ $K = 1,650$ [ - ] $k_c = 14,52$ N/cm <sup>2</sup> $k_\phi = 1,5$ N/cm <sup>2</sup> $k = 0,0119$ kN/cm <sup>2</sup> $n = 0,587$ [ - ]
Parametry bewametu i inne: parametr podobieństwa elementów czynnych bewametu i opony szerokość płytki bewametu parametr skali sił płytki bewametu i opony powierzchnia płytki bewametu	$\lambda = 4,4$ [ - ]; $b_p = 10$ cm $x = 2,7$ [ - ] $F_p = 100$ cm <sup>2</sup>

### Badania polowe weryfikowanych parametrów: zagłębienia, oporu toczenia i siły uciągu kół

Pomiary parametrów trakcyjnych i ruchu kół przeprowadzono zgodnie z metodami stosowanymi do tych celów. Podczas badań polowych – ruchu po glebie spulchnionej badanych opon zamontowanych do ciągnika Ursus C 385 i C 1201 – zmierzono zagłębienie opon, siłę uciągu i opór toczenia. Siłę uciągu mierzono siłomierzem hydraulicznym AK 47, natomiast poślizg kół napędowych metodą filmową [Błaszkiwicz 1988]. Równocześnie dokonywano pomiarów odkształceń promieniowych i bocznych opon metodami i aparaturą przedstawioną w pracach [Błaszkiwicz 1988].

kiewiczza 1996a, 1996b]. Uzyskane rezultaty pomiarów zagłębienia opon i oporu toczenia przedstawiono odpowiednio w tabeli 2 i 3. Przyjęta do weryfikacji zmierzona wartość siły uciągu koła przy poślizgu 15% wyniosła 5,45 kN.

Tabela 2. Błędy względne aproksymacji dla głębokości koleiny wyznaczonej z zaprezentowanych modeli.

Table 2. Approximation errors for the rut depths calculated from the presented models

Modele do wyznaczania głębokości koleiny		$z_a$ [cm] (oblicz.)	$z_d$ [cm] (empir.)	Błąd względny
Nazwa modelu	Model			
Saakjana [1959]	$z = \left(\frac{q}{k}\right)^{\frac{1}{n}} \cdot b_o$	38,48	5,15	647,2 %
Bekkera [1969]	$z = \left[ \frac{3G}{(3-n)(k_c + b_o \cdot k_\phi) \sqrt{d}} \right]^{2/(2n+1)}$	13,49		161,9%
Sołtyńskiego [1977]	$z = \left(\frac{q}{k \cdot \lambda^{(x-2)}}\right)^{\frac{1}{n}} \cdot b_o$	6,58		27,8%
Uffelmana [1961]	$z = \frac{G^2}{(5,7c)^2 \cdot b_o^2 \cdot d}$	14,19		175,5%
Błaszkiwicza	głębokość koleiny z wyznaczana metodami numerycznymi z warunku $G = \sum_{j=0}^j \left[ F_j \cdot k \cdot \lambda^{x-2} \left(\frac{z_j}{b_p}\right)^n \right]$	4,75		7,8%

### Obliczenia weryfikowanych parametrów trakcyjnych kół z analizowanych modeli

Obliczenia z modeli Saakjana, Bekkera, Sołtyńskiego i Uffelmana parametrów trakcyjnych opon takich jak zagłębienie i opór toczenia, dla wyznaczonych i przyjętych parametrów eksploatacyjnych opon i trakcyjnych podłoża, były łatwe do przeprowadzenia gdyż wymagały podstawienia tylko danych wejściowych. Wyznaczenie tych parametrów ze wzoru Błaszkiwicza [1997] wymagało zastosowania dodatkowo programu komputerowego opracowanego przez Błaszkiwicza i Walkowiaka [2000].

Niezbędną do weryfikacji siłę uciągu opony obliczano z modelu Wonga [2001], którego ogólna postać jest następująca:

$$F_d = rb \left[ \int_0^{\theta_0} \tau(\theta) \cos \theta d\theta - \int_0^{\theta_0} p(\theta) \sin \theta d\theta \right] \quad (1)$$

w którym:

- $F_d$  – siła uciągu, kN,
- $r$  – promień koła, cm,
- $b$  – szerokość koła, cm,
- $\tau$  – naprężenia styczne, Pa,
- $\sigma$  – naprężenia normalne, Pa,
- $\theta_0$  – kąt opasania koła przez glebę, rad,
- $\theta$  – rozpatrywany kąt opasania koła przez glebę, rad,

Koncepcja tego modelu jest oparta na założeniach Bekkera [1969], według którego siłę jazdy można wyznaczyć jako całkę z naprężeń stycznych  $\tau$  występujących na powierzchni kontaktu mechanizmu jezdnego z glebą, natomiast siłę oporu toczenia można wyznaczyć jako całkę z naprężeń normalnych  $\sigma$  występujących na powierzchni kontaktu. Siłę uciągu stanowi różnicę pomiędzy siłą jazdy, a siłą oporu toczenia. W niniejszej pracy siłę jazdy obliczono z pierwszego członu zmodyfikowanego modelu Wonga [2001], w którym dokonuje się całkowania naprężeń po kącie opasania koła glebą na powierzchni kontaktu koła mającego kształt cylindryczny. Siłę oporu toczenia wyznaczono natomiast z modelu Bekkera, zalecanego przez Wonga do tego celu. Dokonanie obliczeń z powyższych modeli wymagało w praktyce zbudowania odpowiedniego programu numerycznego przez Szafarza. Wyznaczona ostatecznie wartość siły uciągu koła dla poślizgu koła 15% wyniosła 1,36 kN.

### Wyznaczenie błędów aproksymacji uzyskanych rezultatów obliczeń do wyników badań empirycznych

Dokładność uzyskanych rezultatów obliczeń do wyników badań empirycznych opisano za pomocą błędów względnych aproksymacji. Błędy te obliczano dla wszystkich rezultatów obliczeń zagłębienia, oporu toczenia i siły uciągu z przedstawionych modeli, według następującego wzoru:

$$e = 100 \cdot \frac{|w_a - w_d|}{w_d}, \% \quad (2)$$

$e$  – błąd względny aproksymacji, %,

$w_a$  – wartość parametru (zagłębienie koła, opór toczenia, siła uciągu) uzyskana z obliczeń,

$w_d$  – wartość parametru (zagłębienie koła, opór toczenia, siła uciągu) uzyskana w badaniach empirycznych.

Obliczone wartości błędów dla zagłębienia opon i oporu toczenia zamieszczono odpowiednio w tabeli 2 i 3. Natomiast błąd względny aproksymacji obliczonej siły uciągu do jej wartości empirycznej wynosi 75,1%.

Tabela 3. Błędy względne aproksymacji dla oporu toczenia opony wyznaczonego z zaprezentowanych modeli

Table 3. Relative approximation errors for the rolling resistance of the tyre calculated from the presented models

Modele wyznaczające opór toczenia		$Pf_a$ [kN] (oblicz.)	$Pf_d$ [kN] (empir.)	Błąd względny
Nazwa modelu	Model			
Bekkera [1969] (dla koła sztywnego)	$P_f = \frac{1}{(3-n)^{(2n+2)/(2n+1)} (n+1) (k_c + b \cdot k_\phi)^{1/(2n+1)} \left( \frac{3G}{\sqrt{d}} \right)^{(2n+2)/(2n+1)}}$	3,15	1,85	70,3%
Bekkera [1969] (dla koła odkształcalnego)	$P_f = \frac{b(p_i + p_c)^{(n+1)/n}}{(n+1)(k_c / b + k_\phi)^{1/n}}$	3,14		69,7%
Uffelmana [1961]	$P_f = \frac{G^2}{5,7 c \cdot b \cdot d}$	4,13		123,2%
Błaszkiwicz [1997]	$P_f = \frac{\sum_{j=0}^j \left[ F_j \cdot k \cdot \lambda^{x-2} \left( \frac{z_j}{b_p} \right)^n \cdot z_j \right]}{l}$	1,45		21,6%

### Omówienie wyników badań

Wyniki badań przedstawione w tabeli 2 i 3 pozwalają na empiryczną weryfikację analizowanych modeli do wyznaczania parametrów trakcyjnych kół i na ocenę ich przydatności w zakresie warunków badań niniejszej pracy. Z porównania także przedstawionych danych wynika słabe podobieństwo modeli innych autorów do wyników badań empirycznych. Wysokie błędy aproksymacji tych modeli w zakresie wyznaczania głębokości koleiny i oporu toczenia kół, wskazują na małą ich praktyczną przydatność. Jedynie największą dokładnością charakteryzują się

modele Błaszkiwicza (tabela 2 i 3), w których zwiększenie dokładności uzyskano przez opisanie układu koło – gleba wieloma parametrami i przez zastosowanie nowej metody opisu przestrzennego kształtu powierzchni kontaktu opony z glebą, w której uwzględniane są również odkształcenia opony.

Znany i powszechnie stosowany model Wonga [2003] zawierający współzależności sił jazdy, sił oporu toczenia i sił uciągu koła, ze względu na wysoki błąd aproksymacji okazał się również mało przydatny do prognozowania siły uciągu opon w niniejszych warunkach badań. Można przypuszczać, że przyczyną jego niedokładności są w nim zawarte liczne założenia upraszczające. Z powyższego wynika, że nowe wymagające opracowania modele do wyznaczania siły uciągu powinny szczegółowiej opisywać zjawiska zachodzące na powierzchni kontaktu opon z podłożem, co związane jest z większym ich rozbudowaniem, nie stanowiącym jednak ograniczenia praktycznego stosowania ze względu na wspomagającą obliczenia i powszechnie dostępną technikę komputerową.

### **Podsumowanie**

Na podstawie analizy wyników badań empirycznych i symulacyjnych można stwierdzić małą dokładność modeli innych autorów układu koło – gleba dla warunków spulchnionej gleby lekkiej i że przyczyną wykazanego małego podobieństwa są uproszczenia w nich stosowane. Największą dokładnością charakteryzują się w tym zakresie modele Błaszkiwicza zarówno do wyznaczania głębokości koleiny jak i oporu toczenia dla kół toczonych, opisujące szczegółowo zjawiska występujące na powierzchni kontaktu opon z podłożem. W celu uzyskania większej dokładności modeli do wyznaczania siły uciągu opon oraz większej ich funkcjonalności należy dokonać modyfikacji dotychczasowych modeli lub zbudować nowe, wykorzystując, między innymi, dotychczasowe dokonania.

### **Bibliografia**

Bekker M.G. 1969. Introduction to Terrain-Vehicle Systems. Ann Arbor. The University of Michigan Press.

Błaszkiwicz Z. 1995. Przyrząd do badania właściwości mechanicznych podłoży miękkich. Opis ochronny wzoru użytkowego PL 54258Y1.

Błaszkiwicz Z. 1990. A method for the determination of the contact area between a tyre and the ground. Journal of Terramechanics. 127. 4. 263-282.

Błaszkiwicz Z. 1996a. Research methods and measurement results of agricultural tyre deflections on soil. Part I. A method for measuring radial and longitudinal tyre deflections. Annual Review of Agricultural Engineering. 1(1). 131-138.

Błaszkiwicz Z. 1996b. Research methods and measurement results of agricultural tyre deflections on soil. Part II. A method for measuring lateral tyre deflections. Annual Review of Agricultural Engineering. 1(1)/96. 139-146.

Błaszkiwicz Z. 1997. Analiza wpływu wybranych parametrów opon rolniczych na ugniatanie gleby. Roczniki AR w Poznaniu. Rozprawy Naukowe. Zeszyt 271.

Błaszkiwicz Z., Walkowiak R. 2000. Zastosowanie techniki komputerowej do obliczania parametrów współpracy opon z podłożem. Inżynieria Rolnicza 3 (14): 17-27.

Dwyer M.J. 1984. The tractive performance of wheeled vehicles, Journal of Terramechanics. 21(1): 19-34.

Okello J.A. 1991. A review of Soil Strength Measurement Techniques for Prediction of Terrain Vehicle Performance. J.Agric. Engng Res. 50, 129-155.

Saakjan S. 1959. Wzaimodziejstwie biedomego kolesa i poczwy. Erewań.

Sołtyński A. 1977. Traction parameters of soil. Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych. 183: 131-143.

Uffelmann F.L. 1961. The performance of rigid wheels on clay soils. Proc. 1<sup>st</sup> Int. Conf. Soil Vehicle Mechanics.

Wong J.Y. 2001. Theory of ground vehicles. Third edition by John Wiley & Sons, Inc.

## **ACCURACY ANALYSIS OF THE TYRE-SOIL MODELS TO THE CONDITIONS OF THE LOOSENED LIGHT SANDY SOIL**

### **Summary**

In this work the accuracy analysis of the known tyre – soils models was performed to the conditions of the light sandy soil. The calculated values from the models of the traction parameters: tyre sinkage, rolling resistance and drawbar pull, on the basis the tyre and traction soil parameters, were compared with the investigation results, respectively. It was stated the small accuracy of the models other authors in the analysed soil conditions, exception of the Błaszkiwicz computer based models for the tyre sinkage and rolling resistance, included many tyre and soil parameters.



**Key words:** models of the tyre - soil system, numerical and empirical verification, loosened light sandy soil